

работоспособность установки НЛиП не вызывает затруднений. Распределение температуры элементов установки после реализации предложенных решений представлено на рисунке 3.

Для исключения перегрева элементов установки и нарушения технологического процесса НЛиП сплава АК-12 (при стационарном тепловом режиме) необходимо обеспечить массовый расход воды в змеевике, расположенном на дугообразном сегменте, 0,1252 кг/с, в кольцевых профилированных каналах, расположенных в корпусе (внешнем и внутреннем), – 0,0586 кг/с. При таком режиме охлаждения соблюдаются условия технологического процесса: температура сплава перед попаданием под дугообразный сегмент не превышает точку солидуса, прутка на выходе из матрицы – 427 °С.

Список использованных источников

1. Горохов Ю.В. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография / Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов, Н.Н. Довженко [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – 268 с.
2. Пат. 102550 Российская Федерация, МКП В 21 С 23/08. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, Ю.В. Горохов [и др.]; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.
3. Скуратов А.П. Исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия в переходном режиме / А.П. Скуратов, А.С. Потапенко, Ю.В. Горохов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10. – № 3. – С. 337–345.
4. Потапенко А.С. Моделирование теплового процесса в установке совмещённого литья и прессования цветных металлов / А.С. Потапенко, А.П. Скуратов, А.А. Пьяных // Молодежь и наука: сборник материалов X Юбилейной Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, Красноярск 15–25 апреля 2014 [электронный ресурс]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014.

УДК 669.162.263

Н. А. Спирин, В. С. Швыдкий, В. В. Лавров

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЕВЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ И АГРЕГАТОВ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ МЕТАЛЛУРГИИ

Аннотация

В докладе отражен обзор основных подходов и принципов разработки математических моделей применительно к слоевым металлургическим процессам и агрегатам, которые являются основой современных информационных систем в металлургии. Показано, что несмотря на широкую информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей теплофизических процессов остаются слабо заполненными, что связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических моделей сложных процессов и систем.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплофизические процессы, шахтные печи, доменный процесс, информационные системы.

Abstract

The report reflects an overview of the main approaches and principles for the development of mathematical models for layered metallurgical processes and aggregates, which are the basis of

modern information systems in metallurgy. It is shown that despite the wide informatization, the development of computational mathematics and identification algorithms, banks of certified (verified) mathematical models of thermophysical processes remain weakly filled, which is associated with great intellectual and time costs for the creation of adequate mathematical models of complex processes and systems.

Key words: mathematical modeling, thermophysical processes, shaft furnaces, blast furnace process, information systems.

Конечная цель разработок систем управления технологическими процессами в металлургии – создание системы, обеспечивающей нормальную работу производства в целом при минимальной себестоимости продукции с учетом ограничений, обусловленных требованиями к качеству продукции, технологии и возможностям оборудования. В области управления технологическими процессами в металлургии сегодня необходимо на основе разработки средств получения объективной информации о параметрах технологического процесса и имеющихся возможностей использования средств интеллектуального обеспечения максимально приблизить управление производством к автоматизированному.

Следует отметить особую роль математических моделей. Известный русский академик А.Н.Крылов в 1937 г. еще в период зарождения вычислительной техники и информатики предупреждал, «что если в вычислительное устройство загрузить информационный мусор, то на выходе вычислителя получим также мусор». Последующий опыт показывает, что только использование адекватных моделей разного класса (математических моделей технологических процессов, моделей знаний, моделей распознавания образов, моделей данных и т. п.) может обеспечить успешность и эффективность функционирования информационных систем. Интеллектуальным ядром такой переработки информации являются математические модели технологических процессов.

Итак, использование математических моделей объектов в процессе их функционирования — одна из основных характерных черт современной теории управления. Заметим, что математическое содержание проблемы управления в трудах крупных математиков получило существенное развитие [1–3]. В то же время академик РАН А.А. Красовский совершенно справедливо отмечал, что "... в развитии современной теории управления с точки зрения практики далеко не все обстоит благополучно. Классическую теорию автоматического управления в основном создавали инженеры для инженеров. Современную теорию управления создают в основном математики для инженеров и во все большей мере математики для математиков" [1]. Последнее с точки зрения практики вызывает определенное беспокойство. Главное негативное влияние на практическое внедрение методов современной теории управления оказывает масса оторванных от практических потребностей и возможностей работ, интересных в математическом отношении, но пока бесплодных в отношении современных приложений. Нельзя отрицать право на существование математической современной теории управления как раздела математики, развивающегося по собственным законам и находящего применение по мере возникновения соответствующих потребностей. Однако такая математическая сторона современной теории управления должна быть достаточно четко выделена по отношению к прикладной ее стороне. Главная проблема заключается в принципиальном игнорировании многими математиками такого фундаментального понятия, как физическая сущность и индивидуальные особенности управляемого объекта [2]. Если на начальном этапе развития классической теории автоматического управления, а в последующем в математической теории оптимального управления, такое абстрагирование от физического содержания, несомненно, было полезным с точки зрения разработки основ теории, то сегодня развитие теории управления требует возврата и учета основополагающих свойств объекта управления, но уже на новом качественном уровне развития современной прикладной теории управления. В современной теории математическое содержание во многом подавляет физическое начало, формальный вычислительный подход не может быть перспективным направлением в развитии прикладной теории управления, несмотря на мощь современной вычислительной техники [2, 3]. Следует

особо подчеркнуть, что начавшаяся еще в конце 1960-х годов "компьютерная эйфория", сводящая сложную проблему математического моделирования технологических процессов и синтеза систем управления лишь к вычислительной мощности ЭВМ, полностью себя исчерпала. Этим, вообще говоря, во многом и завершается формально-математический этап развития теории моделирования и управления в XX в. и начинается этап развития физической теории моделирования и управления [2, 3].

Несмотря на информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей остаются слабо заполненными. Это связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических моделей сложных процессов и систем [4]. Для новых процессов и систем высокой сложности это создает большие трудности, так как эти процессы и системы, как правило, не могут функционировать без управления, а математическая модель часто не может быть идентифицирована и сертифицирована без реально функционирующей системы. Методологической основой создания моделей технологических процессов являются общая теория систем и системный анализ [5, 6]. При использовании этой методологии модель технологических процессов состоит из математических моделей не только отдельных элементов, но и взаимодействия между элементами и внешней средой, описываемых оператором взаимодействия (взаимосвязи). Каждый элемент математической модели может иметь различную степень детализации математического описания. Важно лишь, чтобы входные и выходные параметры всех элементов модели находились во взаимном соответствии, что обеспечит получение замкнутой системы уравнений математической модели процесса в целом. В идеале математическое описание каждого элемента должно включать уравнения, параметрами которых являются только физико-химические свойства веществ. Однако получить такое фундаментальное описание свойств всех элементов, их взаимосвязей и при существующем уровне знаний и исследований некоторых явлений металлургических процессов в настоящее время не всегда представляется возможным. Это связано еще и с тем чрезвычайным усложнением математического описания свойств элементов, что оно само по себе приводит к резкому усложнению математической модели процесса в целом и, кроме того, вызывает существенные вычислительные трудности при ее реализации. В связи с этим при практическом использовании описанного алгоритма на том или ином уровне детализации приходится применять и эмпирические соотношения.

Проиллюстрируем эти положения на примерах математического моделирования (в силу профессиональных пристрастий авторов) преимущественно на примерах исследования теплофизики слоевых металлургических процессов.

До начала шестидесятых годов работы кафедры с элементами математического моделирования носили эпизодический характер. Широкое внедрение математических методов в научные исследования обязано сотрудничеству с лабораторией теплообмена ВНИИМТ, возглавляемой В.Н. Тимофеевым, а впоследствии – Ф.Р. Шкляром. В этот период было решено множество задач теплофизики слоевых металлургических процессов, обобщенных в фундаментальной научной монографии ВНИИМТ [7]. Заметим, однако, что, хотя в этих работах и использовались ЭЦВМ, их нельзя в полной мере отнести к примерам математического моделирования. И это объясняется не слабостью или недостатками упомянутого фундаментального труда, а тем простым обстоятельством, что в то время сами методологии математического моделирования (вычислительного эксперимента) и разработки программного обеспечения еще не были разработаны.

Следует особо подчеркнуть, что, хотя материалы данной монографии полностью оригинальны и содержит большое количество впервые (по тому времени) установленных закономерностей, ни один из полученных результатов не вступает в противоречие с физикой сущности процессов теплопереноса в плотном слое, установленных проф. Б.И. Китаевым [8, 9], который учил нас избегать «математических красот» и уделять главное внимание физической сущности процесса. По сути дела, если использовать современную терминологию, речь идет о том, что следующий этап совершенствования математической

модели процессов тепломассобмена в плотном слое, когда после учета главенствующих факторов, определяющих процесс, приступают к дополнительному включению в модель факторов другого порядка, пусть и очень важных, но влияющих лишь на количественные характеристики ранее установленной физической картины. Мы здесь не имеем возможности подробно останавливаться на рассмотрении отдельных этапов организации и проведении вычислительного эксперимента, отсылая читателя к первоисточникам. Заметим только, что по мере выработки методологии сотрудники кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» оказались готовы не только к ее восприятию, но и развитию применительно к теплофизическим процессам в металлургии [5, 6].

В полной мере использование методологии системного анализа и вычислительного эксперимента в области теплофизики слоевых металлургических процессов связано с разработкой математических моделей газомеханики слоя. Наличие адекватной модели движения газов в плотном слое позволило связать воедино процессы переноса теплоты, массы, физико-химических превращений, и на базе системного подхода перейти к анализу шахтного процесса в целом. Конечно, не все звенья математической модели оказались одинаковой степени полноты и строгости, но основное требование было выполнено: модель учитывала все основные явления и факторы. Варьируя краевые условия процесса, удалось проанализировать процессы в слоевых агрегатах различного типа и найти оптимальные (рациональные) процессы в слоевых агрегатах различного типа. В связи с этим следует отметить два обстоятельства.

Во-первых, если математическое моделирование шахтных печей, работающих без образования фурменного очага и с «сухим» слоем» (т.е. без появления расплава в объеме агрегата), позволив решить множество задач, в общем-то, не выявило ранее неизвестных явлений [9–11], то в отношении исследования фурменного очага зоны доменной печи положение существенно изменилось: установлены новые закономерности, которые не могли быть обнаружены экспериментально. Оказалось, что в области горна имеет место существенно циркуляционное движение газа, причем степень циркуляции изменяется в пределах 1,5–2,11. Вычислительный экспериментом установлено, что наибольший эффект дает вдувание в доменную печь малозольных углей с высоким содержанием летучих [5, 11].

Во-вторых, при анализе процессов в агрегатах шахтного типа наиболее узкими звеньями триады «модель – алгоритм – программа» является не только разработка самой структуры математической модели, но и выбор эффективного вычислительного алгоритма и параметрическая идентификация модели [5, 6].

Накопленный к настоящему времени опыт математического моделирования теплофизических процессов и, в частности, слоевых металлургических печей наглядно показывает, что достоверность результатов моделирования и их точность в значительной степени определяется полнотой модели, т.е. степенью учета главных (или определяющих) явлений или процессов, протекающих в агрегате.

Развитие математического моделирования процессов в шахтных печах в последнее время шло в направлении учета процессов плавления материалов и газодинамики и стационарного теплообмена в шахтных слоевых печах, в которых газовый поток перемещается в сложной системе искривленных каналов переменной кривизны и площади поперечного сечения. Так, в работе [12] сформулирована задача стационарного теплообмена в шахтных слоевых печах, в которых побудительной причиной движения обрабатываемых материалов является их плавление. Здесь проявляется та особенность процессов переноса энергии, что их интенсивность в значительной степени определяется скоростью движения материала, которая в свою очередь существенно зависит от темпа плавления частиц. Поскольку единственным способом примирения указанного противоречия является итерационный подход, то в целом при математической формулировке задачи приходится прибегать к идеализации отдельных явлений. В частности, отдельные идеализации являются вынужденными в силу недостаточной теоретической проработки ряда вопросов, например, математической теории движения сыпучих материалов в шахтных печах. При описании газомеханики слоя в работе используется приближение безвихревого течения. В работах [13,

14] выполнена постановка задачи разработки математических моделей газодинамики и стационарного теплообмена в шахтных слоевых печах, в которых газовый поток перемещается в сложной системе искривленных каналов переменной кривизны и площади поперечного сечения. Проблема разработки комплексных математических моделей слоевых металлургических печей и агрегатов состоит в том, чтобы получить уравнения течения газа в движущемся слое, связывающие среднюю скорость в межкусковом пространстве (истинную скорость), его действительное давление и температуру, так как именно от этих величин зависит интенсивность протекания физико-химических превращений. Решение этой проблемы выполнено с использованием параллели между течением газа в слое и движением гипотетической жидкости, занимающей весь объем аппарата, включая и объем кусковых материалов.

Характерным примером, что достоверность результатов моделирования и их точность в значительной степени определяется полнотой модели, являются кинетические модели доменного процесса, позволяющие решать определенный круг практических задач: получать температурные и концентрационные поля доменной печи при плавке специальных чугунов, вдувании горячих восстановительных газов; оценивать влияние на показатели работы печи таких параметров плавки, как восстановимость, степень металлизации железорудных материалов, реакционная способность кокса; определять общие закономерности динамических характеристик печи по различным каналам [15–17]. В ряде случаев кинетические модели обогащаются моделями газодинамики, что расширяет область их применимости [15, 17]. При условиях значительного расширения методов численного моделирования и дальнейшего исследования доменного процесса в перспективе появятся реальные предпосылки для использования полных аналитических кинетико-математических моделей доменного процесса с большими возможностями.

В то же время сегодня существуют серьезные проблемы при создании и использовании кинетических моделей этого класса, которые сводятся к следующим [18, 19]:

- все они не учитывают закономерностей движения материалов в рабочем пространстве печей, вследствие недостаточной изученности и сложности описания движения шихтовых материалов, расплава в доменной печи.
- отсутствие достаточных данных для достоверного описания процессов, протекающих в нижней части печи. Так, нет надежных данных о зависимости скоростей восстановления железа и кремния от температуры, состава шлака и кокса, о коэффициентах теплоотдачи между газом, коксом и жидкими продуктами плавки, не поддается полному математическому описанию продолжительность пребывания чугуна и шлака между горизонтами перехода в жидкое состояние и уровнем фурм;
- проблематичность учета влияния неравномерности распределения компонентов шихты и газа, фракционного состава шихты на ход процессов теплообмена, восстановления окислов, газификации углерода и др.;
- обязательность введения существенных допущений, положенных в основу моделей этого класса, обусловленных необходимостью предварительного определения кинетических характеристик железорудного сырья и соответствующей параметрической настройки модели для конкретных условий доменной плавки ограничивают их практическую применимость для решения задач текущего анализа, прогноза и управления ходом плавки.

Математическое описание закономерностей движения материалов в слоевых агрегатах различного типа – это одна из наиболее сложных проблем, до сих пор не получившая сколь-нибудь достоверного, хотя бы полуколичественного, разрешения. К настоящему времени в литературе предложено множество различных подходов к решению этой проблемы, однако всем им присущ общий недостаток: адекватность математических моделей не доказана.

Данные обстоятельства не позволяют устранить основное противоречие этого подхода, а именно: увеличение сложности модели и числа учитываемых факторов не приводит к повышению надежности результатов моделирования. В силу изложенного можно согласиться с выводом И. Г. Товаровского [20], что "...для прогноза выходных параметров плавки на данном этапе развития целесообразно использовать относительно простые зависимости для

тепломассообмена, газомеханики и других процессов, совмещенные с балансовыми уравнениями, результаты которых легко контролировать данными практики". При этом найдет применение натурная информация о работе доменной печи, появится возможность адаптации модели в темпе с процессом, а результаты моделирования можно будет легко контролировать по фактическим (натурным) данным. Подчеркнем дополнительно, что одна из главных проблем математического моделирования доменного процесса связана с разрешением противоречий между сложностью моделируемого процесса и необходимостью решения технологических задач в одном темпе с процессом за заданный интервал времени с использованием реально имеющейся информации. Как показывает практика, с помощью полных моделей доменного процесса решить эту проблему не удастся. Определение конечных результатов доменной плавки с использованием прогнозных моделей этого класса дает не бóльшую достоверность, чем некоторые балансовые модели.

В основу модели теплового состояния современной доменной плавки положены закономерности теплообмена, разработанные Б.И. Китаевым и развитые его учениками [8–11]. Перспективным для решения рассматриваемых задач оказался натурно-математический подход, разработанный в Сибирском индустриальном университете [21]. Применительно к доменному процессу этот подход использован Б.И. Китаевым и его учениками [9, 18, 19, 22]. Выполненными ими исследованиями установлено, что модель теплового состояния доменной печи в целом пригодна для решения задач контроля и анализа теплового режима этого агрегата. Однако были выявлены и недостатки: особенности дутьевого, газодинамического и шлакового режимов, неравномерность распределения материалов и газов не находили должного отражения в этой модели, что ограничивало область ее практического применения. Используя методологию системных исследований, последующее совершенствование модели доменного процесса путем учета особенностей газодинамического, дутьевого и шлакового режимов, реально доступной информации о работе доменной печи, неравномерности распределения материалов и газов значительно расширили возможности этой модели [22–24]. Следует особо отметить, что при разработке моделей этих подсистем, параметрической идентификации широко использовались достижения других ведущих отечественных научных школ в области исследования и математического моделирования доменного процесса, а также хорошо проверенные практикой эмпирические уравнения. Однако основой моделей этих подсистем остаются фундаментальные, физические представления о процессах доменной плавки.

Несмотря на многообразие математических моделей доменного процесса, большинство их расчетное, т.е. позволяют исследовать методом перебора один или несколько заранее выбранных вариантов работы печи, но не дают возможности аналитически рассчитывать область оптимальных параметров доменного процесса. Выбор таких параметров зачастую проводится на основании практических данных, интуитивных соображений. Оценивая в целом состояние реально функционирующих систем оптимального управления технологическими процессами и их комплексами в металлургии, следует констатировать, что и здесь имеется внутренняя причина слабого внедрения такого класса систем, особенно для сложных систем [23–25]. Необходимо объединение современной теории оптимального управления с математическими моделями технологических процессов, основу которых составляют фундаментальные закономерности, отражающие физику технологических процессов в металлургии. Такой подход возвращает теорию управления к естественным источникам ее возникновения, но на новом, естественно-математическом витке ее развития.

Именно примером физического подхода в использовании теории оптимального управления является решение задач управления выбором состава доменной шихты, распределением топливно-энергетических ресурсов в доменном производстве [25–26]. Наибольшие сложности связаны с разработкой методов количественной оценки влияния того или иного ресурса на показатели плавки в конкретной технологической ситуации.

При постановке и решении требуется не только изучение характеристик, описывающих влияние изменений условий плавки на технико-экономические показатели работы отдельных печей, но и выполнение детального анализа для математического описания как внешних, так

и внутренних ограничений, учета различных функций кокса в доменной плавке. При выборе основных ограничений при решении задач оптимизации распределения топливно-энергетических ресурсов применены физическое обоснование и классификация лимитирующих факторов при использовании комбинированного дутья в доменные печи, представленные в работах [8, 9, 11]. Разработанная с учетом этих положений модель позволяет решать задачи оптимального распределения расхода природного газа и технологического кислорода в различных технологических ситуациях.

Математическое решение этой задачи выбора оптимального состава доменной шихты сводится к нелинейному математическому программированию. В общем случае, рациональный режим доменной плавки при изменении поставок железорудного сырья для доменных печей, железорудных компонентов аглошихты, а также при изменении свойств кокса обеспечивается многовариантной корректировкой: составом железорудной части агломерационной шихты; расходами флюсов в агломерационную шихту; расходами флюсов в доменную шихту; соотношением компонентов железорудной части доменной шихты; дутьевыми параметрами и параметрами комбинированного дутья; любой комбинацией указанных вариантов [23–26].

Список использованных источников

1. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Колесников А.А. Современная прикладная теория управления / Под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: ТРТУ, 2000. Ч. 1. – 400 с., Ч. 2. – 559 с., Ч. 3. – 656 с.
3. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – 320 с.
4. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии. Кемерово; М.: Издательское объединение «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2006. – 431 с.
5. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии / Н.А. Спирин, В.С. Швыдкий, В.И. Лобанов, В.В. Лавров. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 205 с.
6. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов теплопереноса / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев [и др.]. – М.: Интернет-Инжиниринг, 1999. – 520 с.
7. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков, В.М. Малкин, В.С. Швыдкий, Ф.Р. Шкляр, Ю.Г. Ярошенко. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
8. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. Теплообмен в доменной печи. — М.: Металлургия, 1966. — 355 с.
9. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов [и др.]. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
10. Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Гордон Я.М., Боковиков Б.А., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. – М.: Металлургия, 1989. – 120 с.
11. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 243 с.
12. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов / Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спирин Н.А. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 6. С. 424–430.
13. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 1 / Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спирин Н.А. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. С. 634–638.
14. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. сообщение 2 / Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спирин Н.А. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 1. С. 19–23.

15. Доброскок В.А., Кузнецов Н.А., Туманов А.И. Математические модели процессов газодинамики и восстановления в доменной печи // Изв. вузов. Черная металлургия. 1985. № 3. С. 145–146.
16. Мойкин В.И., Бабушки Н.М., Боковиков Б.А. Анализ работы доменной печи на комбинированном дутье с применением метода математического моделирования // Сталь. 1984. № 4. С. 9–14.
17. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 162 с.
18. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
19. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
20. Товаровский И.Г. Доменная правка. Монография. – Днепропетровск, ПОРОГИ, 2009. – 768 с.
21. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев [и др.]. – М.: Издат. объединение «Российские университеты», 2008. – 487 с.
22. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей // Сталь. 2000. № 9. С. 12–15.
23. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 456 с.
24. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с.
25. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров [и др.]. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2006. – 307 с.
26. Использование современных информационных технологий для анализа доменного процесса / Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Краснобаев А.В., Павлов А.В. // Металлург. 2016. № 5. С. 13–19.

УДК 669.046.564:621.785

М. В. Темлянцева¹, К. С. Коноз¹, О. В. Кузнецова¹, В. Б. Деев², Э. Я. Живаго¹

¹ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Россия;

² ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический институт «МИСиС»,
г. Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ОКАЛИНООБРАЗОВАНИЯ СТАЛИ МАРКИ 40С2 ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ

Аннотация

В статье представлены результаты исследования кинетики высокотемпературного окисления стали марки 40С2. Для осуществления прогнозных расчетов получено уравнение, позволяющее определить угар в зависимости от температуры и времени нагрева. Исследованы особенности строения, химического и фазового состава окалина, образующейся при высокотемпературном нагреве стали марки 40С2.

Ключевые слова: нагрев стали, окисление стали, окалина.

Abstract

The article presents the results of a study of the kinetics of high-temperature oxidation grade steel 40S2. For the implementation of calculations of the derived equation to determine the heat